



Regenerative Energiequellen **Möglichkeiten und Grenzen** aus physikalisch-chemischer Sicht

Gotthard Seifert

Physikalische/Theoretische Chemie

TU Dresden

Materials for Energy Research Group - MERG

WITS University, Johannesburg, SA

Grundlagen – Definitionen, Begriffe

Energie

ist ein Maß für die zugeführte bzw. abgeführte (verrichtete) Arbeit

$$W = \int F_s ds \rightarrow [W] = kg \cdot m^2 / s^2 = J = Ws$$

$\Delta W > 0$ Arbeit, die **am** System verrichtet wird.

$\Delta W < 0$ Arbeit, die **vom** System verrichtet wird.

Maßeinheiten

Bezeichnung		J	erg	cal	eV	kWh	TWa	kgSKE
Joule	J	1	$1.00 \cdot 10^7$	0.2389	$6.24 \cdot 10^{18}$	$2.78 \cdot 10^{-7}$		$3.41 \cdot 10^{-8}$
Erg	erg	$1.00 \cdot 10^{-7}$	1					
Kalorie	cal	4.1855		1	$2.63 \cdot 10^{19}$	$1.16 \cdot 10^{-6}$		
Elektronenvolt	eV	$1.60 \cdot 10^{-19}$		$3.83 \cdot 10^{-20}$	1	$4.45 \cdot 10^{-26}$		
Kilowattstunde	kWh	$3.60 \cdot 10^6$		$8.60 \cdot 10^5$	$2.25 \cdot 10^{25}$	1		$1.23 \cdot 10^{-1}$
Terawattjahr	TWa	$3.16 \cdot 10^{19}$		$7.55 \cdot 10^{18}$		$8.77 \cdot 10^{12}$	1	$1.08 \cdot 10^{12}$
kg Steinkohle	kgSKE	$2.93 \cdot 10^7$		$7.00 \cdot 10^6$		8.14		1

Energieerhaltung

In einem *abgeschlossenen* System bleibt bei allen physikalischen Vorgängen die *Gesamtenergie konstant*. Energie kann nur in verschiedene Energieformen umgewandelt oder zwischen Teilsystemen ausgetauscht werden

$$\sum_i W_i = \text{const.}$$

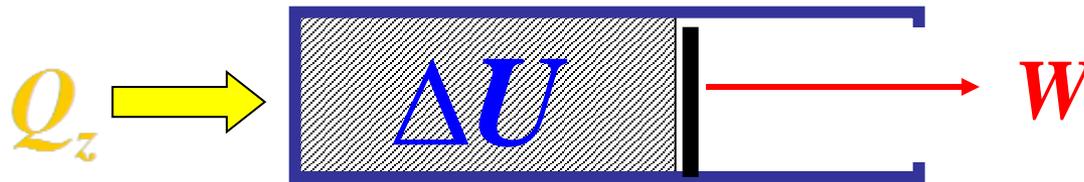


$$Q_z \approx Q_a$$

I. Hauptsatz der Thermodynamik

„Energieerhaltungssatz“

$$Q = \Delta U + W$$



Zustandsgrößen

Temperatur **T**
innere Energie **U**
Entropie **S**
Druck **p**
Volumen **V**

Prozeßgrößen

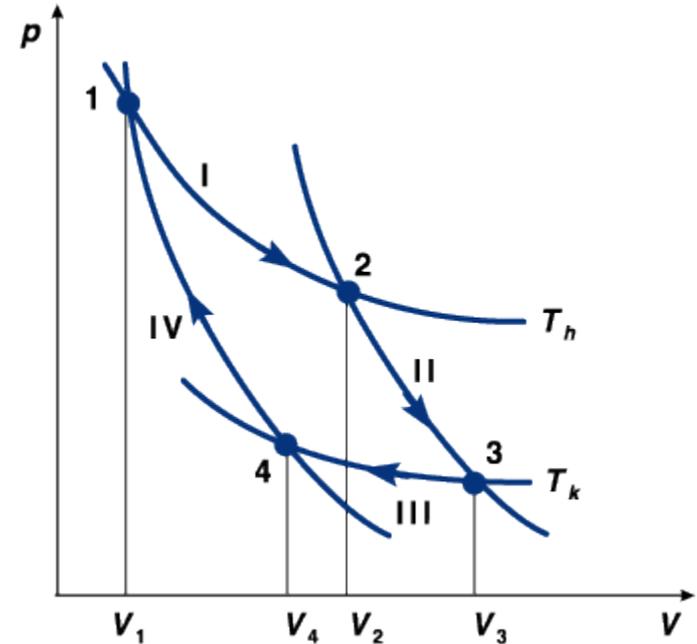
Ausgetauschte Wärme **T**
Geleistete Arbeit **W**

Wärmekraftmaschine

Carnot-Prozeß

- I 1→2 Isotherme Expansion $W_1 = Q_h > 0$
- II 2→3 Adiabatische Expansion $W_2 = -\Delta U_2 > 0$
- III 3→4 Isotherme Kompression $W_3 = Q_t < 0$
- IV 4→1 Adiabatische Kompression $W_4 = -\Delta U_4 < 0$

$$W = W_1 + W_3 = Q_h + Q_t = |Q_h| - |Q_t| > 0$$

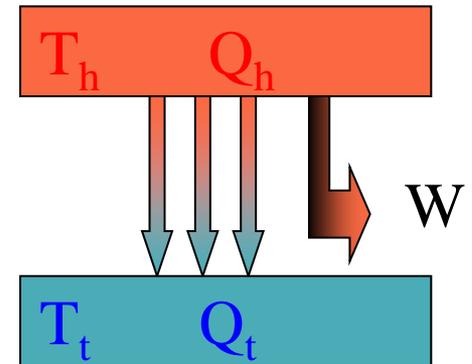


Wirkungsgrad: $\eta = \frac{W}{Q_h} = (Q_h + Q_t) / Q_h = 1 - T_t / T_h < 1$



Bereits ohne Berücksichtigung von Verlusten (z.B. Reibung) kann Wärme nicht vollständig in (mechanische) Arbeit umgewandelt werden.

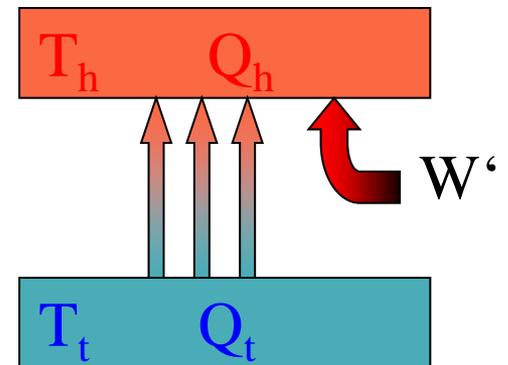
Der nicht umgewandelte Teil der Wärme wird unvermeidlich an die Umgebung – Wärmebehälter bei tiefer Temperatur T_t abgegeben.



Wärmepumpe:

Leistungsverhältnis:

$$\varepsilon_W = \frac{|Q_h|}{|W|} = T_h / (T_h - T_t) > 1$$



Exergie - E_x

„verfügbare/umwandelbare“ Energie (Wärme)

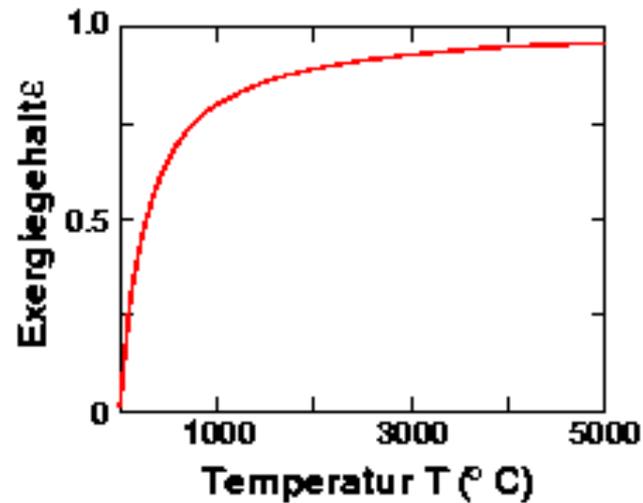
$$E_x = Q_h (1 - T_t / T_h)$$

Exergiegehalt - ε_x

$$\varepsilon_x = \frac{E_x}{Q_h} = 1 - T_t / T_h < 1$$

Beispiel:

$$T_t = 273 \text{ K} = 0^\circ\text{C}$$



II. Hauptsatz der Thermodynamik

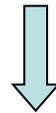
Entropie

Entropie S Maß für den Ordnungszustand eines Systems

$$\Delta S = Q / T$$

II. Hauptsatz: $\Delta S \geq 0 \left\{ \begin{array}{l} \Delta S > 0 \text{ irreversibel} \\ \Delta S = 0 \text{ reversibel} \end{array} \right.$

In einem abgeschlossenen System kann die Entropie nicht abnehmen

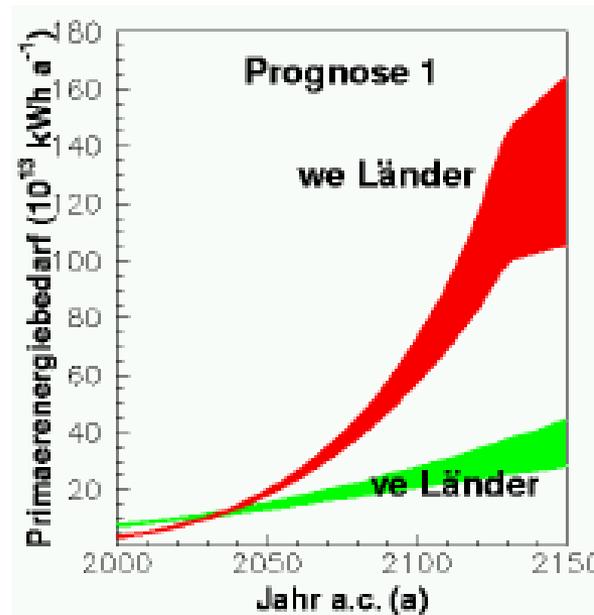


Man kann nicht ausschließlich ein Wärmereservoir abkühlen und dabei Arbeit leisten, Wärme hundertprozentig in Arbeit verwandeln.

Man braucht immer ein zweites Reservoir, das man aufheizt.

Energiebedarf

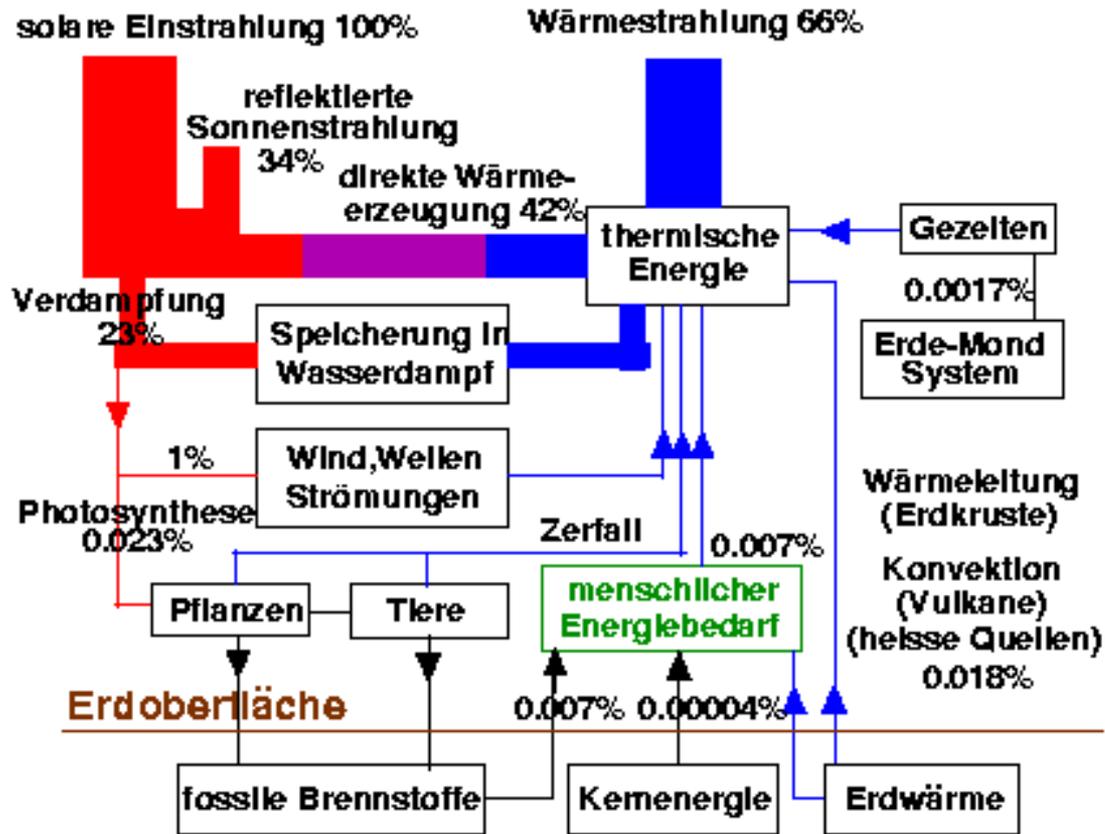
*Entwicklungsprognose
des
Primärenergiebedarfs*



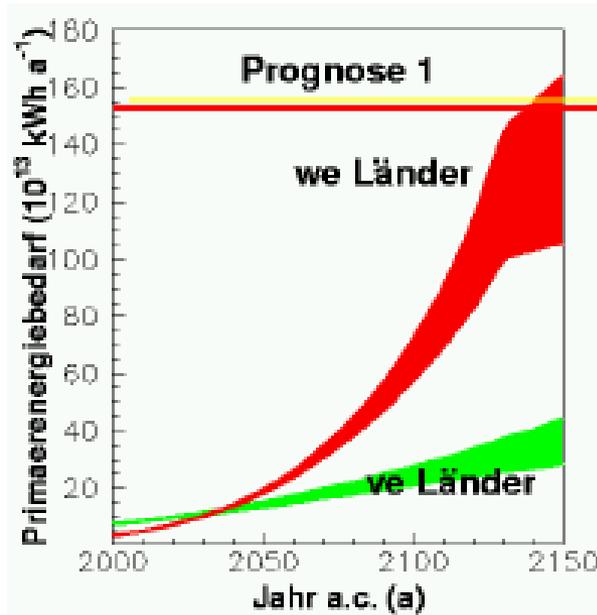
Entwicklungsländer

Industriestaaten

Energiehaushalt der Erde



Solare Einstrahlung



0.1% solarer Einstrahlung

Solare Einstrahlung: $1.5 \cdot 10^{18}$ kWh a⁻¹

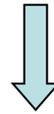
Reflexion: 34% { 30% *Atmosphäre*
4% *Erdoberfläche*

Absorption: 66% { 16% *Atmosphäre*
50% *Erdoberfläche* } → *Wärmestrahlung*

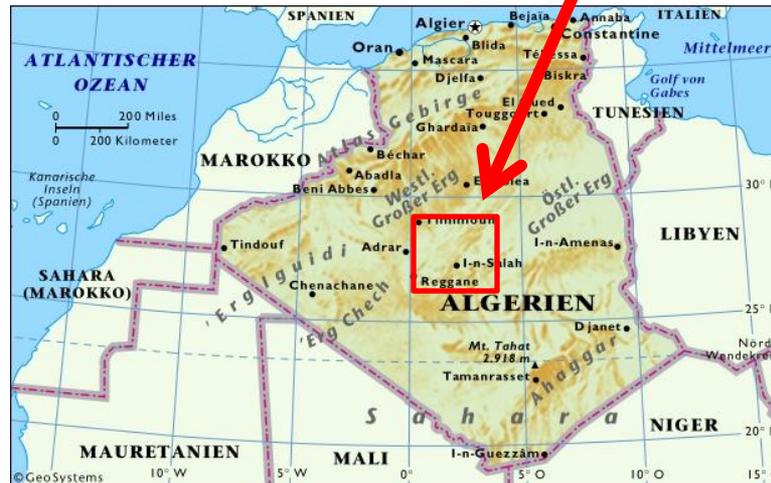
Leistungsdichte der Solarstrahlung auf Erdoberfläche:

$$k=1.46 \cdot 10^3 \text{ kWh a}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

bei Primärenergiebedarf von $\sim 200 \cdot 10^{12} \text{ kWh a}^{-1}$



Flächenbedarf von $\sim 1.4 \cdot 10^{11} \text{ m}^2$



Wirkungsgrad – η

Solarzelle als Wärmekraftmaschine

Carnot $\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_0}{T_S}$

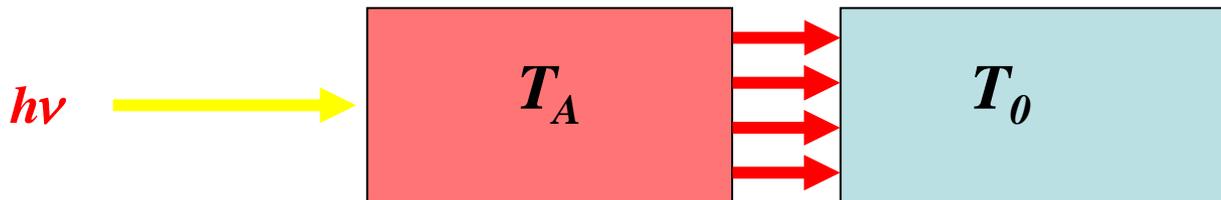
$T_{\text{Raumtemp.}} = T_0 = 300\text{K}$ $T_{\text{Sonne}} = 6000\text{K} \Rightarrow \eta_{\text{Carnot}} = 0.95$

P – Wärmeleistung

Stefan-Boltzmann $P = \sigma T^4$

σ – Stefan-Boltzmann-Konstante $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$

$$\eta_{\text{Stefan-Boltzmann}} = \frac{\sigma T_S^4 - \sigma T_A^4}{\sigma T_S^4}$$



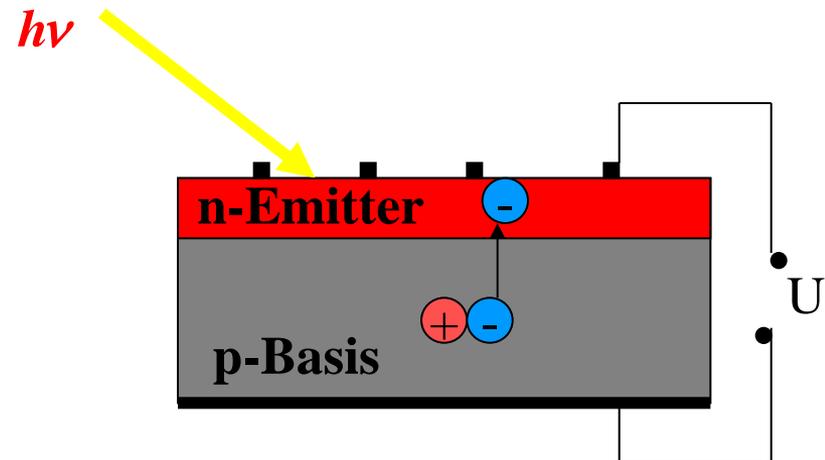
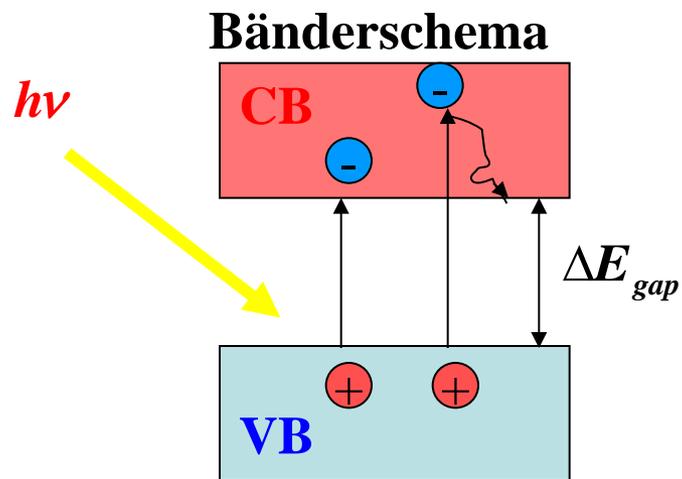
$$\eta_{\text{gesamt}} = \eta_{\text{Stefan-Boltzmann}} \cdot \eta_{\text{Carnot}} = \left(\frac{\sigma T_S^4 - \sigma T_A^4}{\sigma T_S^4} \right) \left(1 - \frac{T_0}{T_A} \right)$$

T_A (optimal) = 2480K $\rightarrow \eta_{\text{gesamt}} = 0.85$

Photovoltaik

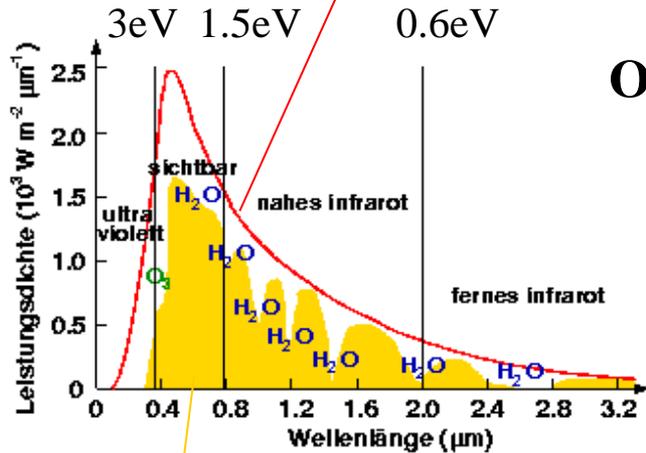
Direkte Umwandlung von *Solarenergie* in
elektrische Energie

Solarzelle



Wirkungsgrad – η

Planck'sches Strahlungsgesetz $T_{\text{Sonnenoberfläche}} = 5800 \text{ K}$

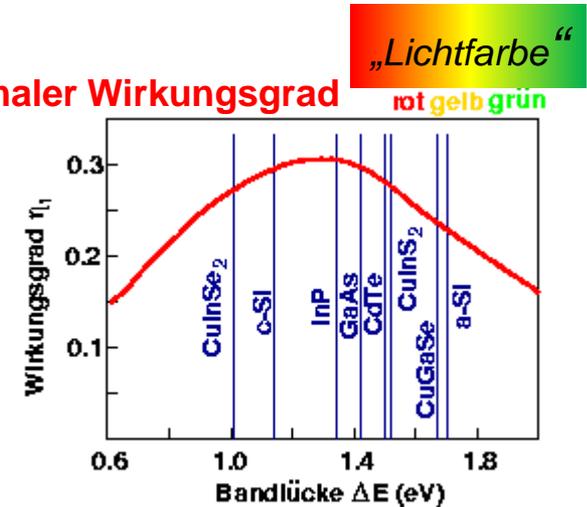


Erdoberfläche nach Absorption in Atmosphäre

Optimierung der Gap-Größe (Bandlücke)



Maximaler Wirkungsgrad



$\eta_1 \leq 0.33$ Bandlücke (Shockley-Queisser-Grenze)

$\eta_2 \leq 0.85$ Temperatureffekte

$\eta_3 \leq 0.80$ Reflexion an Kontakten



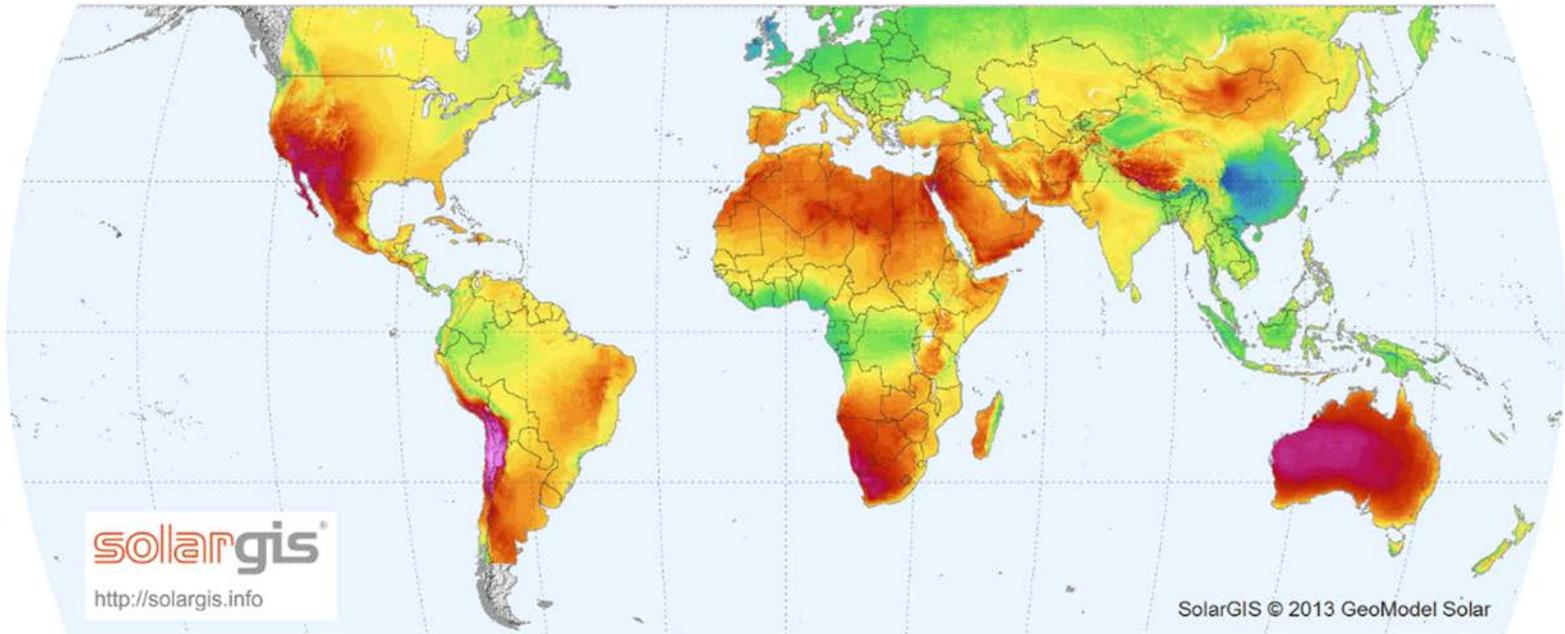
$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \leq 0.22$$

„Ausweg“: \rightarrow „Tandemzellen“

Durchschnittliche Globalstrahlungssummen

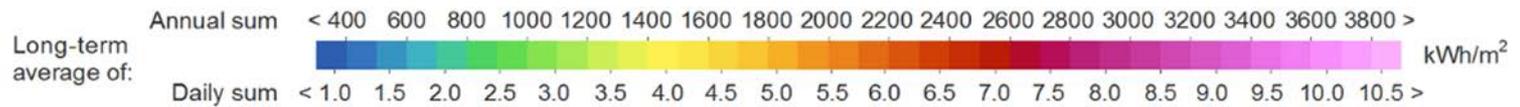
WORLD MAP OF DIRECT NORMAL IRRADIATION

GeoModel
SOLAR

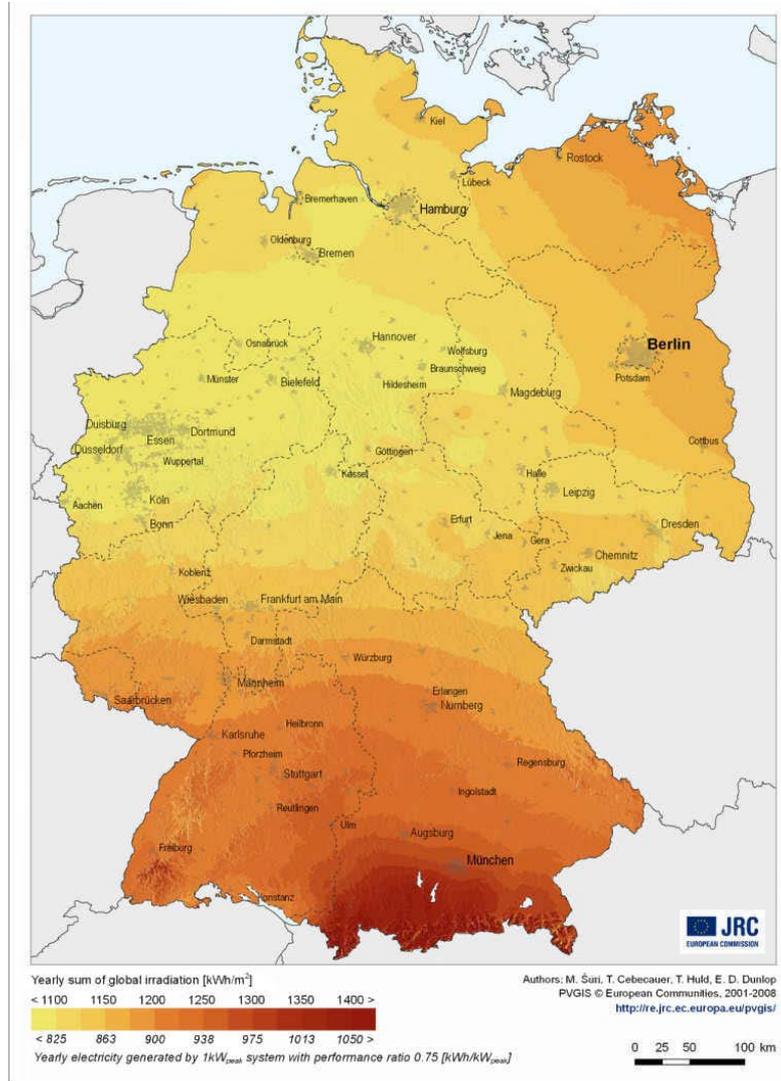


solarGIS
<http://solargis.info>

SolarGIS © 2013 GeoModel Solar



Globalstrahlungssummen in Deutschland



kWh/m²

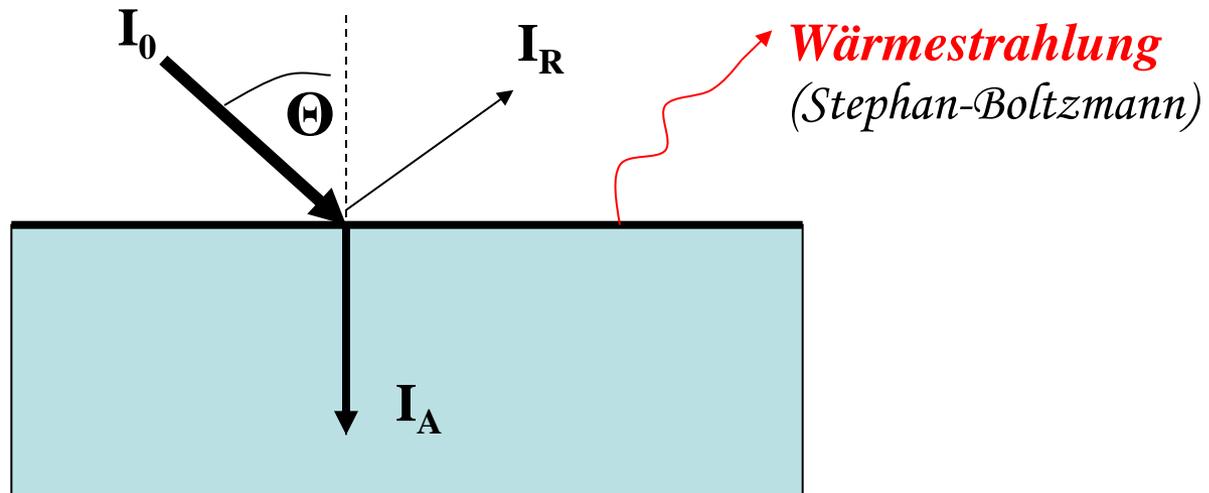


Vergleiche

Algerien ≥ 2000 kWh/m²
 Australien > 3000 kWh/m²

Solarthermie

Umwandlung/Speicherung von **Solarenergie** als
Wärmeenergie



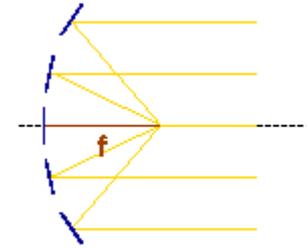
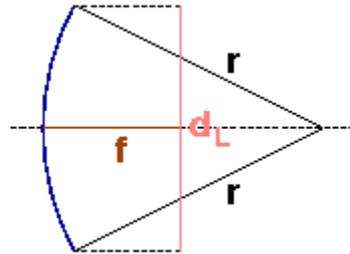
Absorbierte Energie Q_A

$$Q_A = kAt\alpha(\lambda)\cos\Theta$$

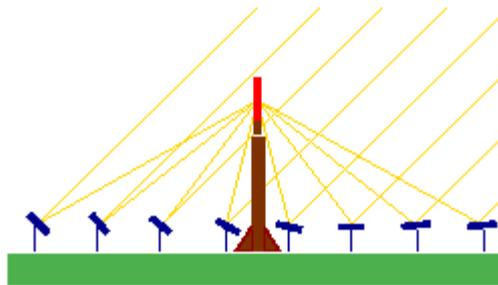
$k=1.46 \cdot 10^3 \text{ kWh a}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ A}$ – Fläche, t – Zeit, α – Absorptionsgrad ≤ 1

Lichtkonzentratoren

Parabolspiegel



Heliostaten

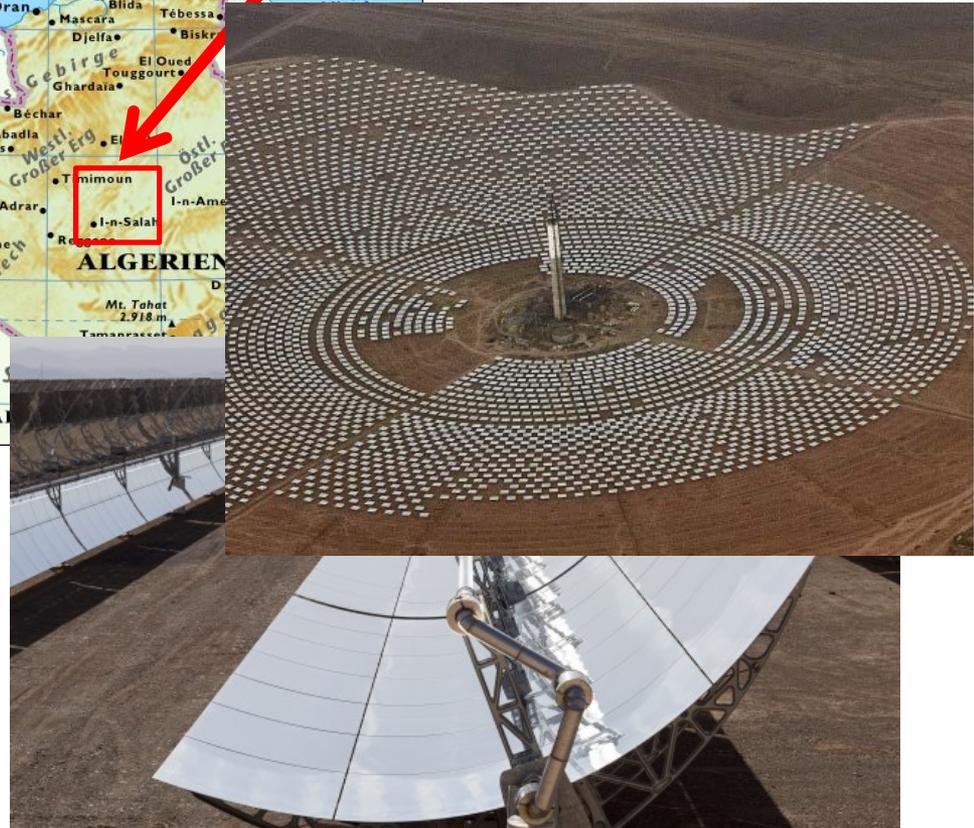


$$1000 \text{ K} \leq T \leq 4000 \text{ K} \quad \eta < 0.1$$



z.B. Wasserstoffherzeugung: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$

Solarkraftwerk in der Sahara?



Noor Power Station

500 MW ThermoSolar (NOOR I-III)

2-3 Mio. m³ Kühlwasser/a

NaNO₃/KNO₃ Latentwärmespeicher

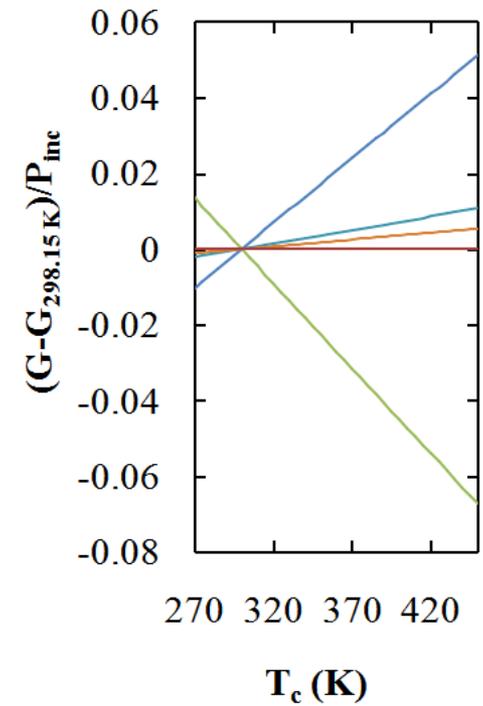
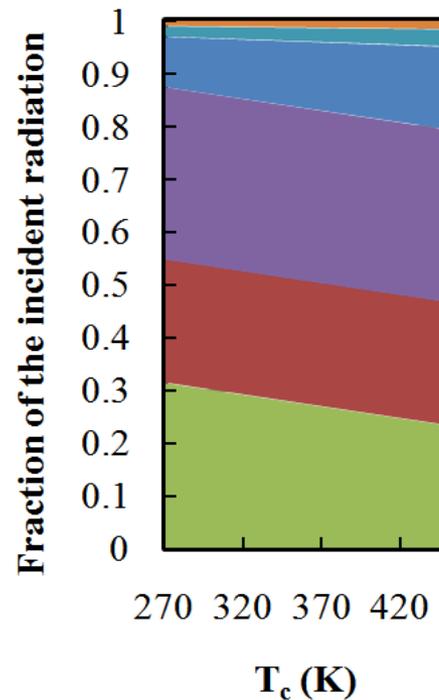
NOOR IV 70 MW PV



Mit steigender Temperatur werden PV-Zellen weniger effizient.

Temperaturkoeffizient β in ppm/K:

$$\beta_G(T_c) = \frac{10^6}{G(298.15\text{K})} \frac{G(T_c) - G(298.15\text{K})}{T_c - 298.15}$$



Windenergie

Umwandlung/Speicherung von **Solarenergie** über
Windenergie in elektrische Energie

lokale Unterschiede der **Sonneneinstrahlung**



lokale Unterschiede der **Temperatur ΔT**



Zustandsgleichung $pV=nRT$

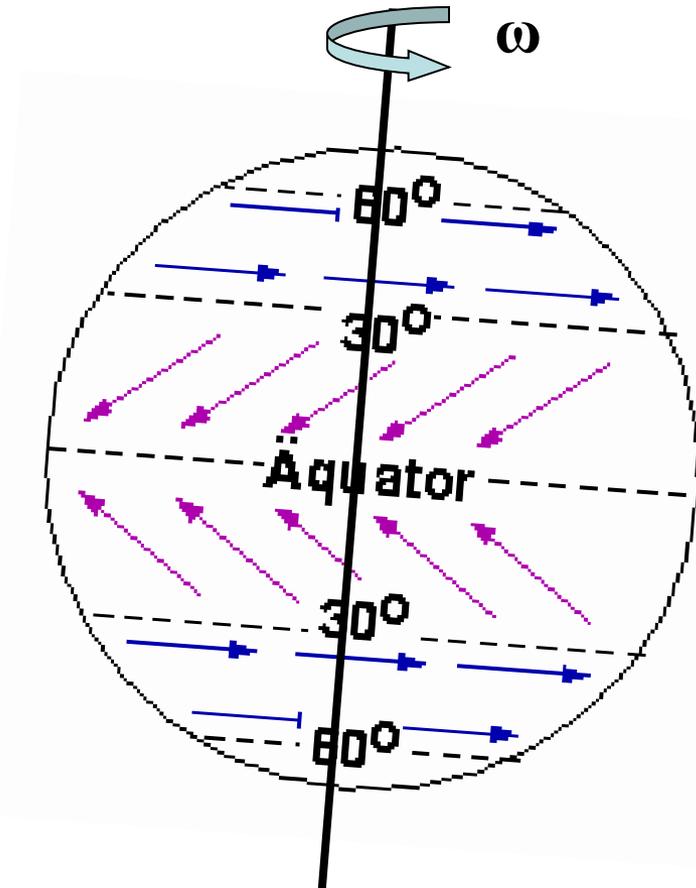
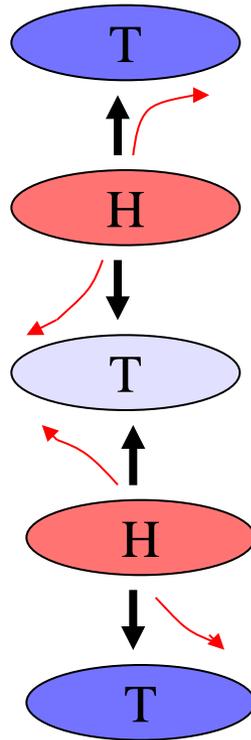
lokale Unterschiede im **Druck $\Delta T \sim \Delta p$**
(„**Hoch**“, „**Tief**“)



Wegen Erdrotation (Coriolis-Kraft) kein
einfacher **Druckausgleich Hoch \rightarrow Tief**



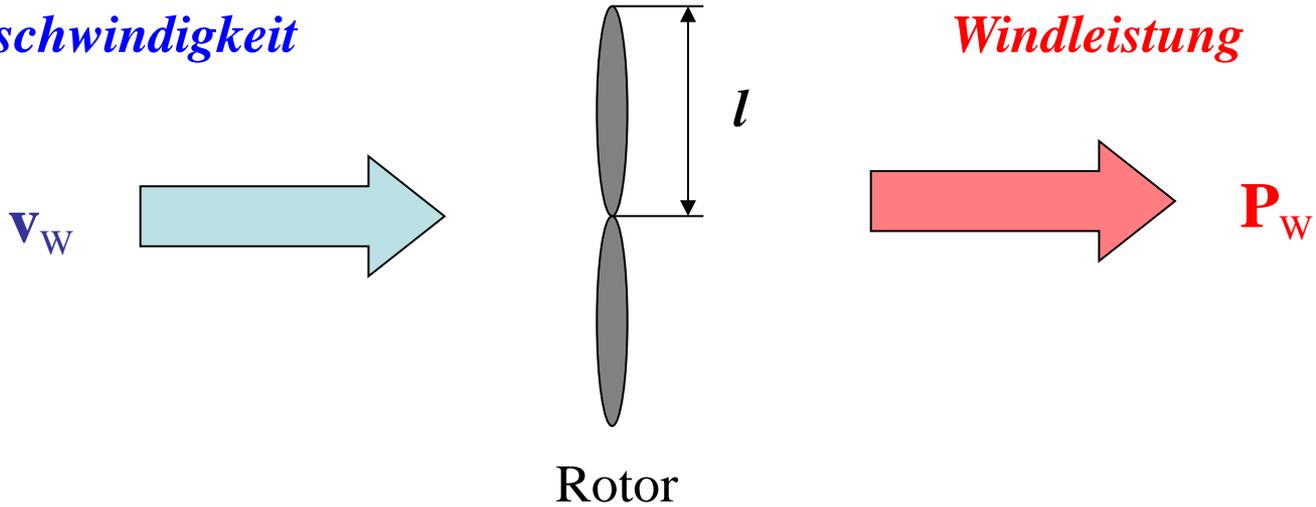
Windverteilung auf der Erde



-ohne Coriolis-Kraft
- mit Coriolis Kraft

$$\mathbf{F}_{Coriolis} = m (\vec{v}_{rel.} \times \vec{\omega})$$

Windgeschwindigkeit



Windleistung

Widerstandsbeiwert

(Luft)-Dichte

$$F_W = c_w \frac{\rho}{2} A v_W^2 \rightarrow P_W = c_w \frac{\rho}{2} A v_W^3 \quad A = \pi l^2$$

(Luft)-Widerstandskraft

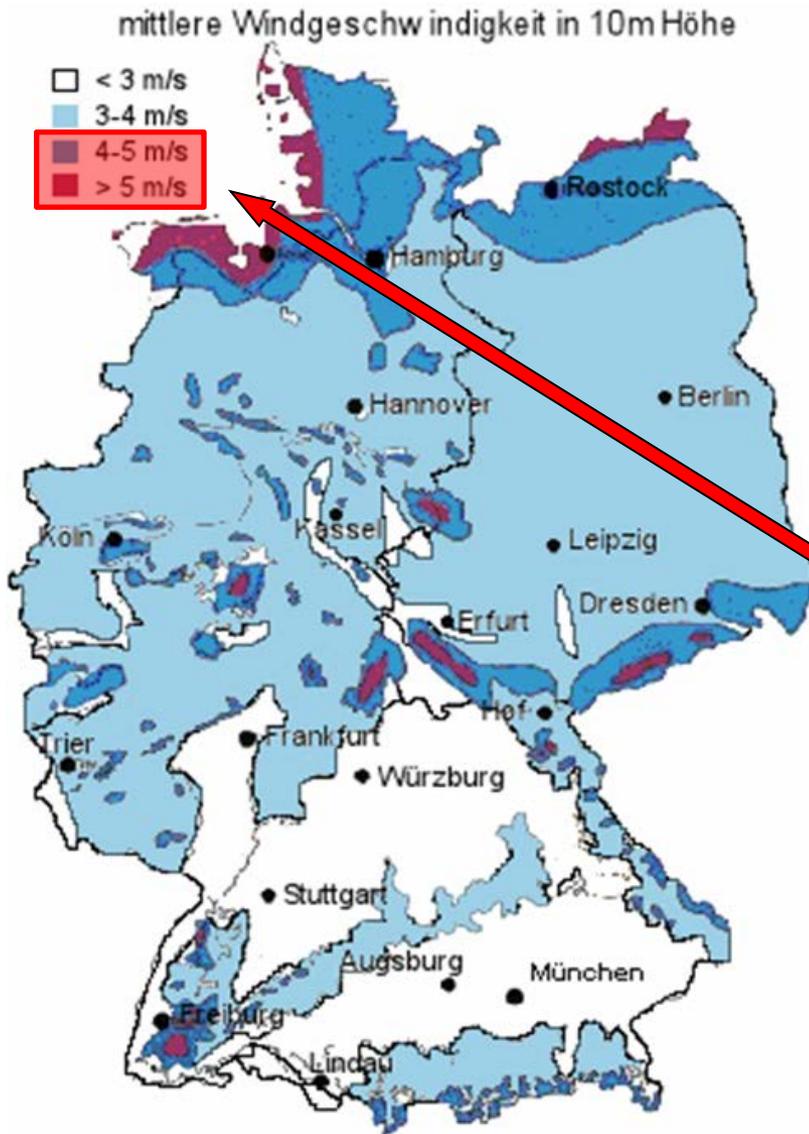
Rotorfläche

$$P_W \sim l^2 \quad \omega = 50 \text{s}^{-1} \rightarrow v_R = \omega l$$

$$l \sim 1 \text{m} \rightarrow$$

$$v_R \sim v_{\text{Schall}} !$$

Windverteilung in Deutschland



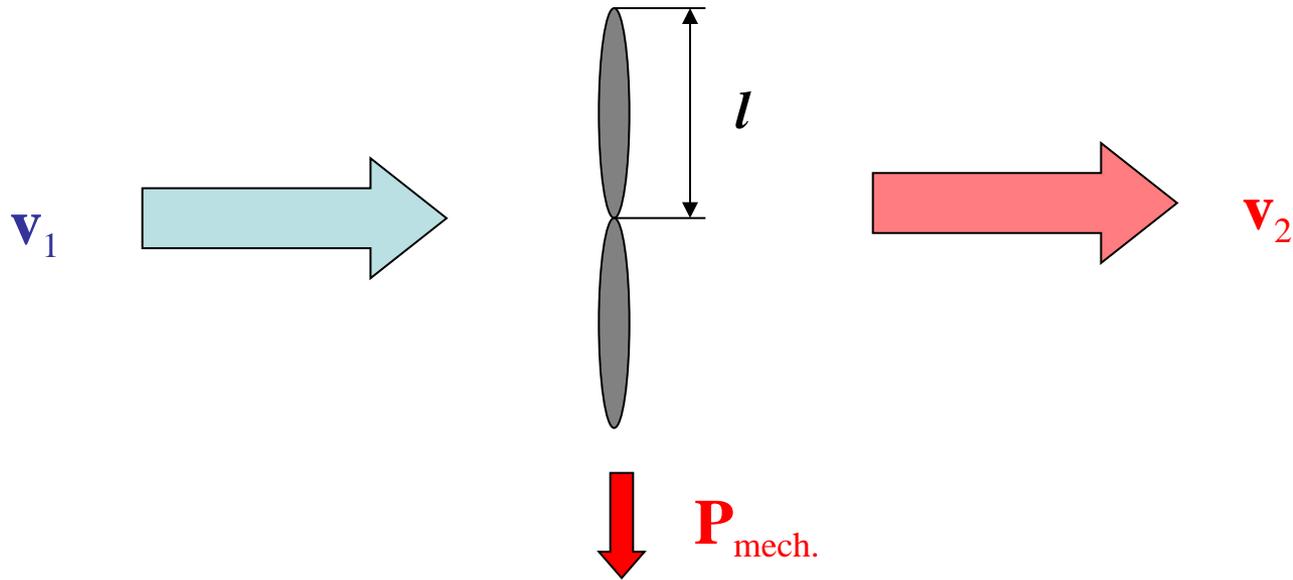
$$P_W \sim v_W^3$$



$$v_W \geq 4 \frac{m}{s} = 14.5 \frac{km}{h}$$

Bedingung für ca. 15%
Landfläche der Erde erfüllt.

Wirkungsgrad η



$$P_{mech} \sim \frac{\rho}{2} (A_1 v_1^3 - A_2 v_2^3) \quad A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad \text{Kontinuitätsgleichg.}$$

$$\rightarrow P_{mech} \sim \frac{\rho}{2} v_1 A_1 (v_1^2 - v_2^2) \quad \text{Maximum } P_{mech} / \text{Optimum } v_1 / v_2$$

$$\rightarrow \eta = \frac{P_{mech}}{P_w} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right) \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} \right) \leq 0.59$$

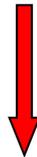
Weiterhin Verluste durch:

Getriebe: Verlust ca 4% ->

elektrischen Generator: Verlust ca 8% ->

Rotorausrichtung nach Windrichtung und -stärke: Verlust ca 4% ->

elektrischen Transformator: Verlust ca 2% ->



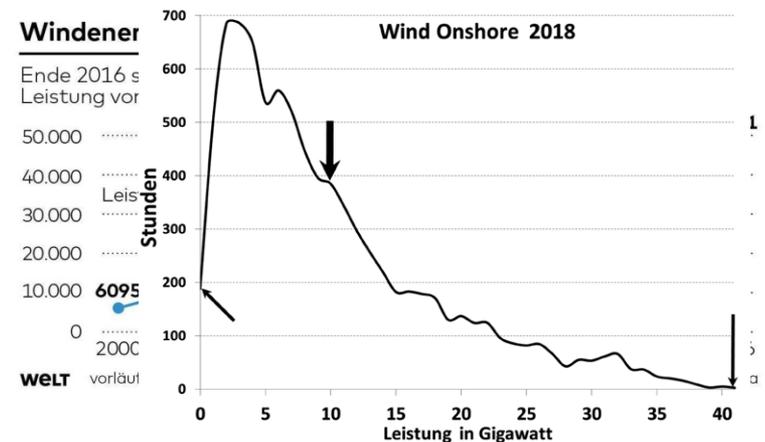
Gesamtwirkungsgrad $\eta_G \leq 0.32$



$$P_{\max} \sim 3.7 \cdot 10^{12} \text{ kwh/a}$$

weltweit

~ 0.1 % der Windenergie
~ 2 % des Weltenergiebedarfs
2050

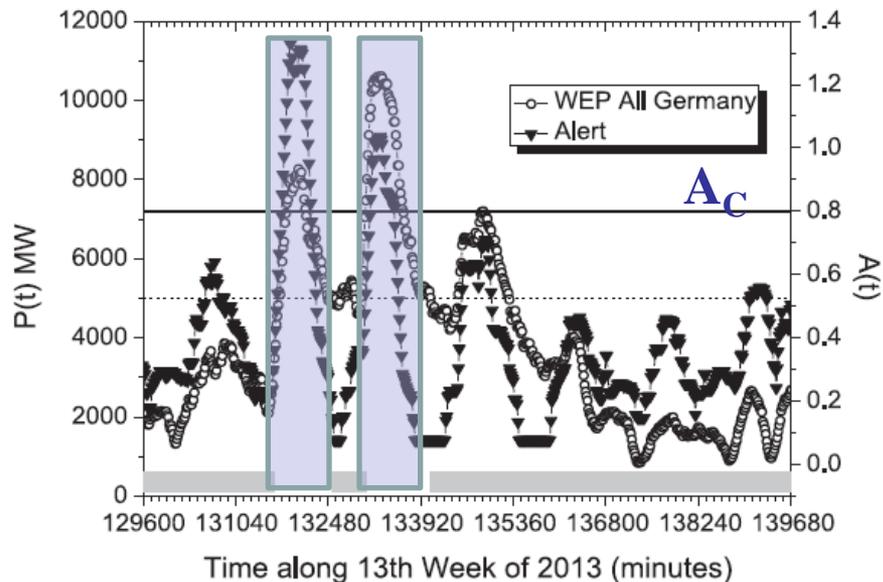


Verfügbarkeit Windenergie:

Beispiel: Windenergie Deutschland 25.-31.3.2013

$A(t) > A_C$ Windenergie „ausreichend verfügbar“

$t \sim 32 \text{ h} - 20\%$ der Gesamtzeit

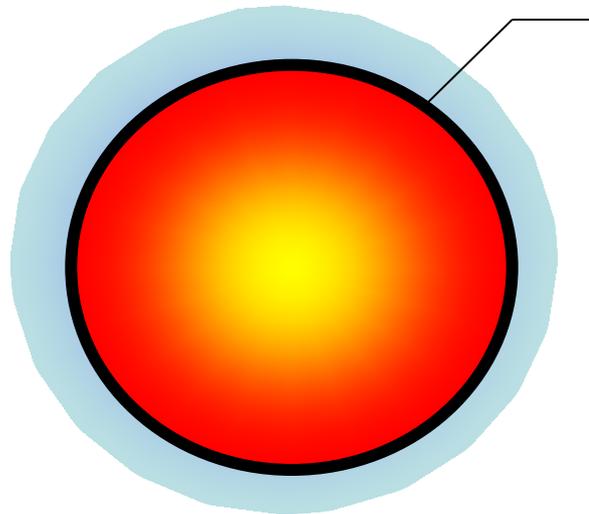
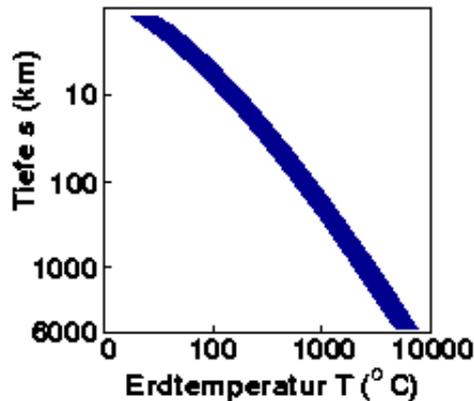


E.E. Vogel, G. Saravia, S. Kobe, R. Schumann, R. Schuster
Renewable Energy **126** (2018) 724.

Erdwärme

Erde als Energie-(Wärme)-Speicher

$$Q_{\text{tot}} \approx 2.8 \cdot 10^{24} \text{ kWh}$$



$$Q_{\text{Kruste}} \approx 1.7 \cdot 10^{20} \text{ kWh}$$

Problem: Wärmeleitung

$$\frac{dQ}{dt} = \lambda \frac{A}{d} \Delta T$$

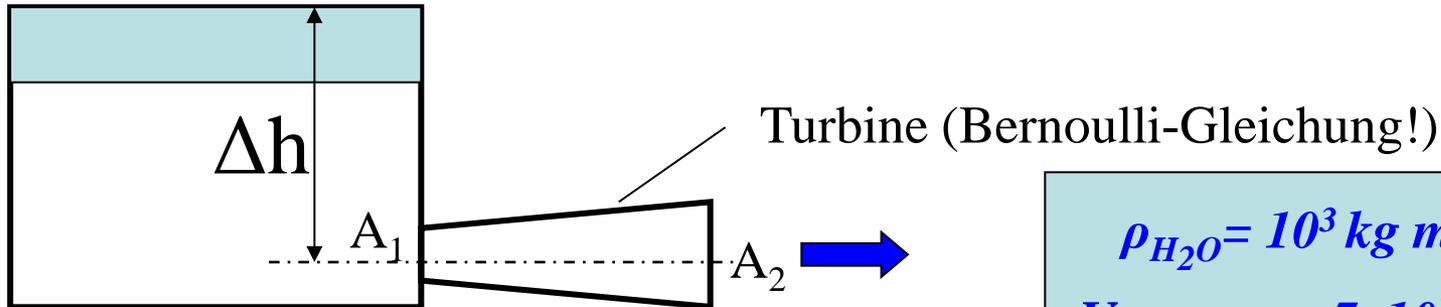
$$\lambda_{\text{Kruste}} \approx 3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$



$$\frac{dQ}{dt} \rightarrow \text{Atmosphäre} \approx 0.0065 \text{ W m}^2$$

Gravitationsenergie

-Wasserkraftwerke, Gezeitenkraftwerke



$$\rho_{H_2O} = 10^3 \text{ kg m}^{-3}$$

$$V_{\text{Niederschlag}} \approx 7 \cdot 10^{13} \text{ m}^3$$

$$g \approx 10 \text{ kg m s}^{-2}$$

$$\overline{\Delta h} \approx 500 \text{ m}$$

Potentielle Energie: $Q = mg\Delta h = \rho Vg\Delta h$

→ $\sim 10 \cdot 10^{13} \text{ kWh a}^{-1} \leftrightarrow \sim 27 \cdot 10^{13} \text{ kWh a}^{-1}$ *Primärenergiebedarf 2050*

Wirkungsgrad: $\rho Vg\Delta h \Rightarrow \frac{\rho V}{2} v_1^2 \xrightarrow[\text{Reibung - R}]{\text{Staudruck}}$ $W = \frac{\rho V}{2} (v_1^2 - v_2^2) - R$

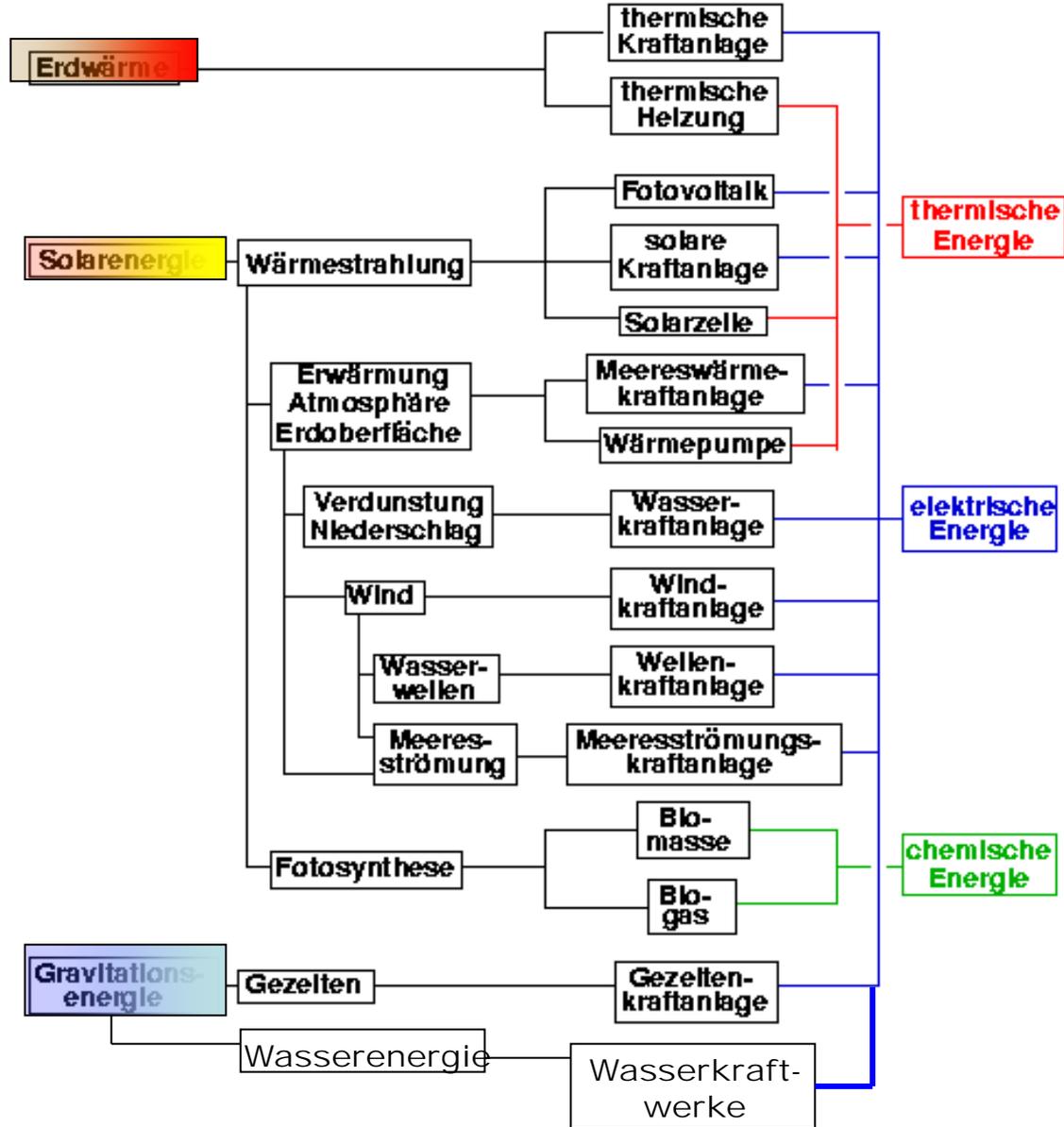
Mit Kontinuitätsgleichung

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Ohne Reibung
→

$$\eta = \frac{W}{Q} \leq 1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2$$

„Erneuerbare Energien“



Nutzungspotenzial

„Erneuerbarer Energien“

- **Wirkungsgrad** = $\frac{\text{Nutzarbeit}}{\text{Aufwand an Energie}} = \eta = \frac{W}{Q} < 1$

Wirkungsgrad aufeinander folgender Prozesse

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdots \eta_N$$

- **Leistungsdichte** = *Leistung/Fläche*

- **Verfügbarkeit**

- **Energierückholzeit** = *Zeit, in der eine Anlage Energie wandeln muss, um HerstellungEnergie zu ersetzen.*

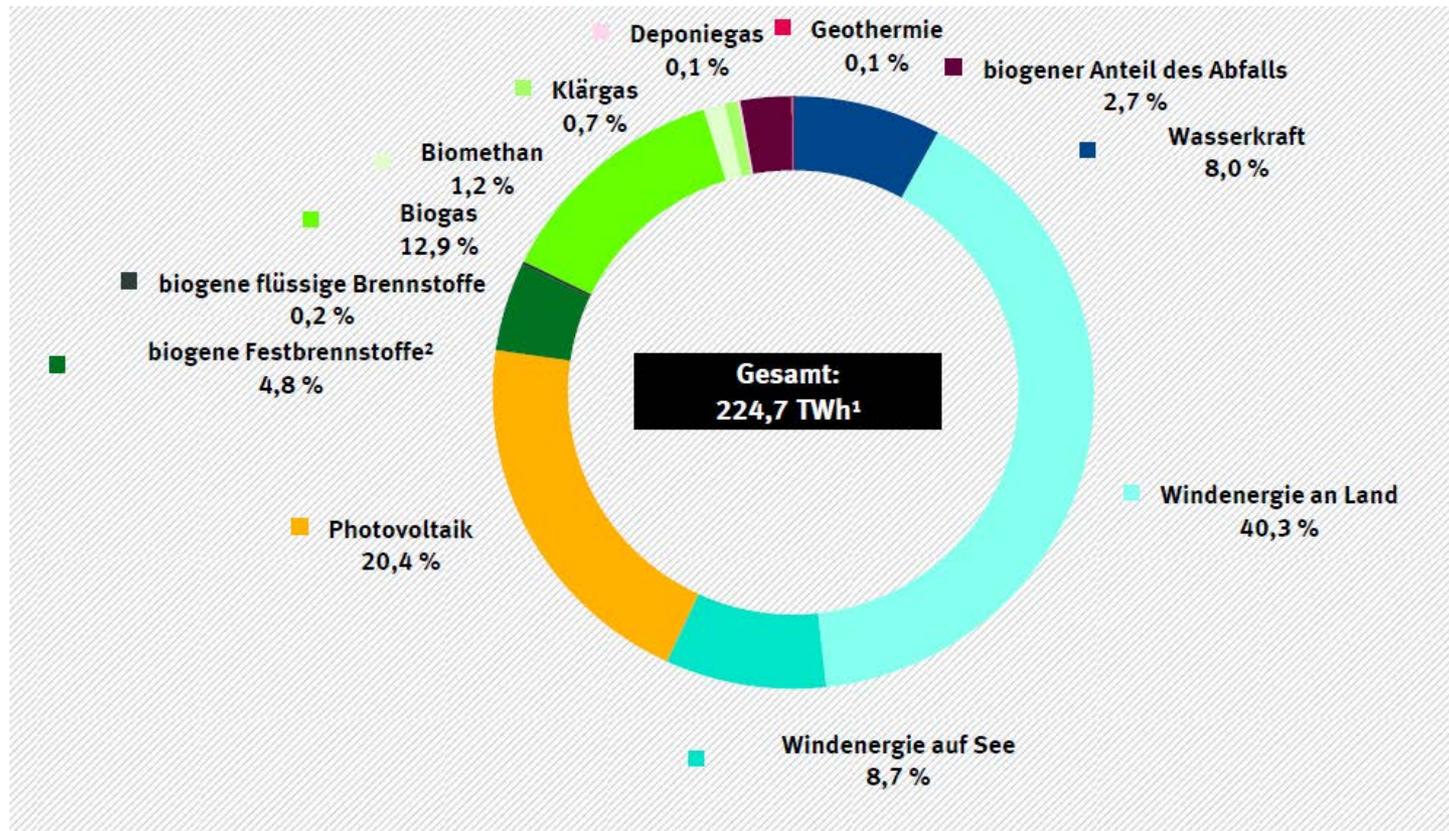
Kenngrößen von Anlagen auf Basis „erneuerbarer“ Energien

	GuD Kraftwerk*		Fotovoltaik		solarthermische Anlage			Windkraftwerk			Wasserkraftwerk		geo-thermi-sche Anlage
Kosten (Eur kWh ⁻¹)	abs.	rel.	Dach-anlage	Groß-anlage	dezentral	zentral	Speicher-wärme	4.5 m s ⁻¹	5.5 m s ⁻¹	6.5 m s ⁻¹	klein	groß	
	0.036	1	10	9	0.7	0.3	1.9	1.7	1.1	0.9	2	1	0.5
Material (kg a kWh ⁻¹)													
Fe	327·10 ⁻⁶	1	300	2200	74	20	3	210	150	110	280	210	51
Cu	10·10 ⁻⁶	1	750	1300	380	0	0	130	90	70	14	9	0.1
Al	10·10 ⁻⁶	1	105	100	255	285	265	60	50	30	3	2	65
Zement	71·10 ⁻⁶	1	0	1100	0	0	618	250	170	140	4300	4200	960
Energierück-holzeit.(a)	0.15	1	33	37	9	4	5	4.3	3.2	2.2	6	4	3
Leistungsdichte (kWh a ⁻¹ m ⁻²)	1.3·10 ⁵	1	3·10 ⁻⁴	3·10 ⁻⁴	1.5·10 ⁻²	2.8·10 ⁻²	1.7·10 ⁻²	6·10 ⁻⁵	9·10 ⁻⁵	12·10 ⁻⁵	2	2	1
Gestehungs-kosten (Eur kWh ⁻¹)	0.04	1	10	9	1.7	0.7	1.3	1.7	1.1	0.9	2	1	0.5

*** GuD Kraftwerk: (Erd)-Gas-Dampfturbine**

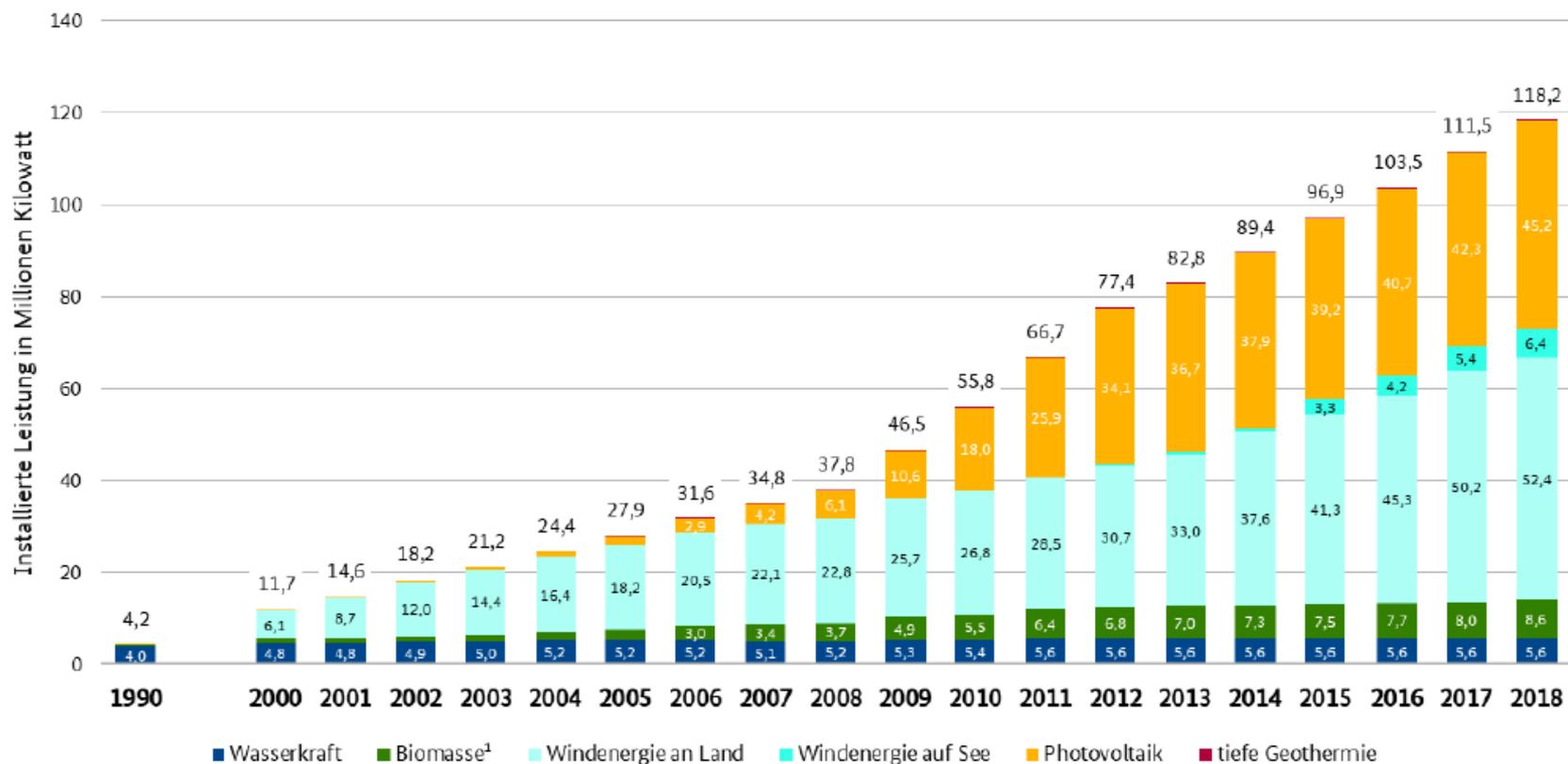
Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Jahr 2018

Anteile in Prozent



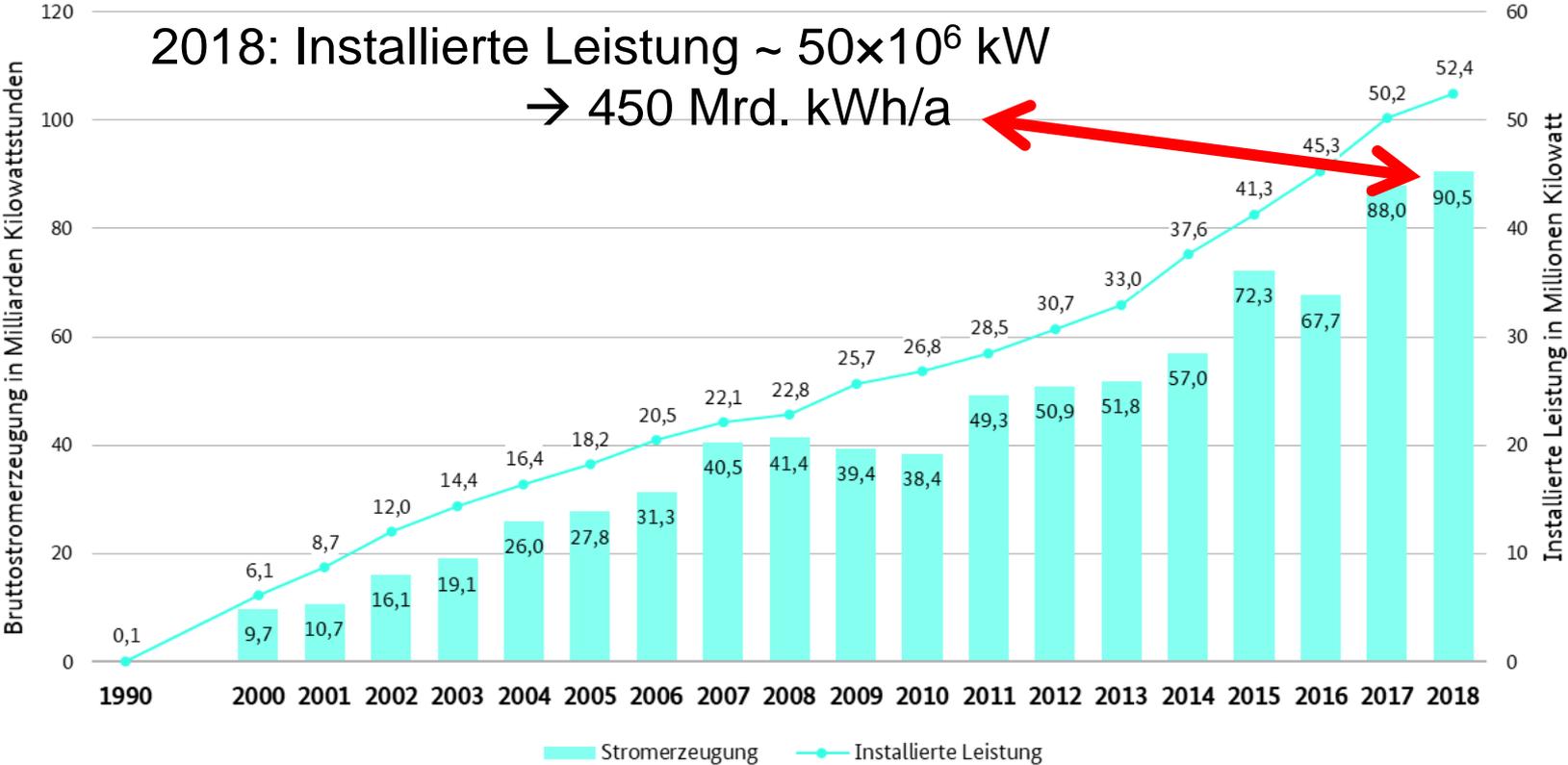
¹ 1 Terawattstunde (TWh) = 1 Milliarde Kilowattstunden (kWh)

Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland

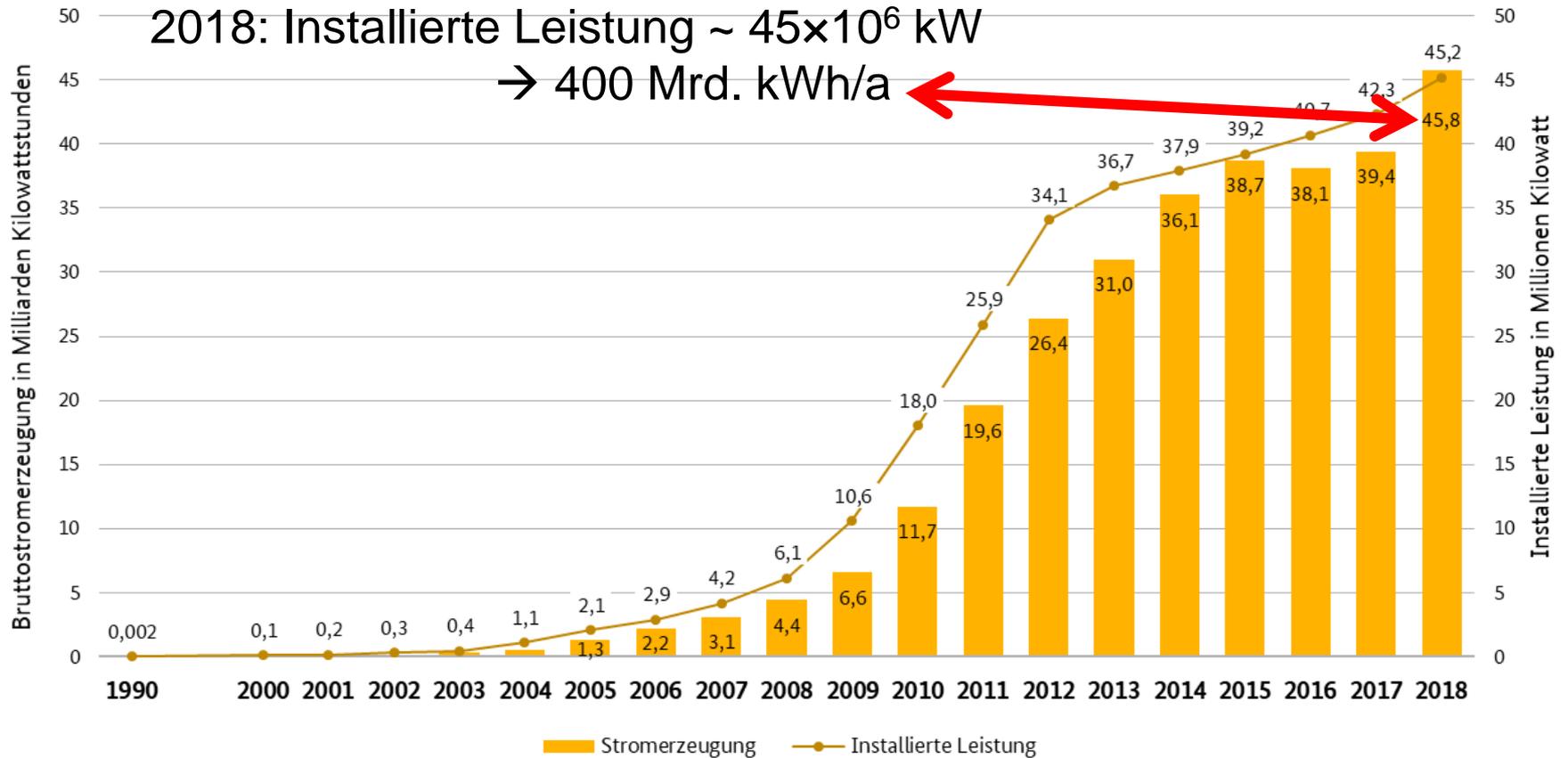


¹ inkl. feste, flüssige und gasförmige Biomasse, Klärschlamm sowie dem biogenen Anteil des Abfalls (in Abfallverbrennungsanlagen mit 50 % angesetzt, ab 2008 nur Siedlungsabfälle)

Entwicklung der Bruttostromerzeugung und der installierten Leistung von Windenergieanlagen an Land und auf See in Deutschland



Entwicklung der Bruttostromerzeugung und der installierten Leistung von Photovoltaikanlagen in Deutschland



Schlußfolgerungen

- *Erneuerbare Energiequellen besitzen beachtliches aber komplexes Potential*
 - *Forschung, Entwicklung und Ausbau*
- *„Naturgesetze“ begrenzen prinzipiell die Ausbaumöglichkeiten*
- *Ökonomie begrenzt Ausbau weiter - €€€ !*
- *In globaler Hinsicht darf keine Energiequelle vernachlässigt werden!*
- *Forschung und Entwicklung von Speichertechnologien!*

Danke für die Aufmerksamkeit!